



ЛИНЕЙНЫЕ, ВЕСОВЫЕ И ОБЪЕМНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПЛЮСНЕВЫХ КОСТЕЙ МУЖСКОЙ СТОПЫ

^{1, 2}Зеркалова Я.И., ^{1, 2}Ермоленко А.С., ¹Зеркалова Ю.Ф.

¹Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия; ²Университет «Реавиз», Санкт-Петербург, Россия;
e-mail: zerkalova.yana@mail.ru

Резюме

ВВЕДЕНИЕ. Определение морфологических особенностей и некоторых физических параметров скелетированных останков человека остается одной из ключевых задач археологической и судебно-медицинской антропологии. Остеометрические параметры стопы, в частности плюсневых костей, могут служить надежными диагностическими маркерами ввиду их относительной функциональной нейтральности и генетической детерминированности.

ЦЕЛЬ. Изучить изменчивость количественных остеометрических показателей и физических характеристик плюсневых костей мужской стопы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Материалом послужили 50 паспортизированных анатомических сухих костных препаратов стоп лиц мужского пола в возрасте 20–70 лет из коллекции кафедры общей и клинической морфологии Ульяновского государственного университета, полученной при выполнении гранта Российского фонда фундаментальных исследований. Проведены прямые остеометрические измерения десяти параметров (костная длина, ширина и высота диафиза, ширина и высота основания, ширина и высота головки, масса, объем, плотность) с использованием электронного штангенциркуля (точность 0,01 мм), электронных весов и метода водного вытеснения. Статистическая обработка выполнена с применением описательной статистики, коэффициента вариации, однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) (уровень значимости $p < 0,05$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Установлены статистически значимые различия между плюсневыми костями I–V по всем изученным параметрам. Наибольшая длина характерна для II плюсневой кости ($72,7 \pm 0,81$ мм), минимальная – для I ($60,5 \pm 0,81$ мм). Наибольшие ширина и высота диафиза, ширина и высота основания и головки, а также масса и объем зафиксированы у I плюсневой кости. Коэффициенты вариации варьируют от 7,2% (длина IV кости) до 33,1% (высота диафиза II кости), что указывает на неоднородную изменчивость признаков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Выявленные закономерности могут быть использованы для идентификации индивидуальных особенностей в судебно-медицинской практике, а также дополняют фундаментальные представления о морфогенезе скелета конечностей.

Ключевые слова плюсневые кости; стопа; остеометрия; физические показатели; морфологическая изменчивость.

Для цитирования Зеркалова Я.И., Ермоленко А.С., Зеркалова Ю.Ф. Линейные, весовые и объемные параметры плюсневых костей мужской стопы. Морфологические ведомости. 2026;34(3):1061. [https://doi.org/10.20340/mv-mn.2026.34\(3\).1061](https://doi.org/10.20340/mv-mn.2026.34(3).1061)

Статья поступила в редакцию 25 августа 2026
Статья принята к публикации 30 сентября 2026



LINEAR, MASS AND VOLUMETRIC PARAMETERS OF MALE METATARSAL BONES

^{1, 2}Zerkalova YaI, ^{1, 2}Ermolenko AS, ¹Zerkalova YuF

¹Ulyanovsk State University, Ulyanovsk; ²REAVIZ Private University, St. Petersburg, Russia;
e-mail: zerkalova.yana@mail.ru

Abstract

INTRODUCTION. Determining the sex of human skeletal remains is a key task in archaeological and forensic anthropology. Osteometric parameters of the foot, particularly the metatarsal bones, can serve as reliable diagnostic markers due to their relative functional neutrality and genetic determinism.

OBJECTIVE. The aim of this study was to examine the variability of quantitative osteometric parameters and physical characteristics of the metatarsal bones in the male foot.

MATERIALS AND METHODS. The material consisted of 50 identified skeletal specimens from male individuals aged 20–70 years. These were obtained from the repository of the Department of General and Clinical Morphology at Ulyanovsk State University as part of a study funded by a grant from the Russian Foundation for Basic Research. Direct osteometric measurements of ten parameters (bone length, diaphysis width and height, base width and height, head width and height, mass, volume, and density) were performed using an electronic caliper (0.01 mm accuracy), electronic scales, and the water displacement method. Statistical analysis was performed using descriptive statistics, the coefficient of variation, and one-way analysis of variance (ANOVA) with a significance level of $p < 0.05$.

RESULTS. Statistically significant differences were found among metatarsal bones I–V for all studied parameters. The greatest length was characteristic of metatarsal bone II (72.7 ± 0.81 mm), while the shortest was for metatarsal bone I (60.5 ± 5.5 mm). The greatest diaphysis width and height, base and head width and height, as well as mass and volume, were recorded for metatarsal bone I. Coefficients of variation ranged from 7.2% (length of bone IV) to 33.1% (diaphysis height of bone II), indicating heterogeneous variability of these characteristics.

CONCLUSION. The identified patterns can be used to establish individual identity in forensic practice and also complement the fundamental understanding of skeletal morphogenesis.

Keywords

metatarsal bones; foot; osteometry; physical indicators; morphological variability.

For the citation

Zerkalova YaI, Ermolenko AS, Zerkalova YuF. Linear, mass and volumetric parameters of male metatarsal bones. *Morphologicheskie Vedomosti – Morphological newsletter*. 2026;34(3):1061. [https://doi.org/10.20340/mv-mn.2026.34\(3\).1061](https://doi.org/10.20340/mv-mn.2026.34(3).1061)

Article received 25 August 2026
Article accepted 30 September 2026

ВВЕДЕНИЕ

Изучение морфологической изменчивости скелета человека остается одной из фундаментальных задач современной антропологии и судебной медицины [1–3]. Особое значение приобретают исследования костей посткраниального скелета, которые нередко являются единственным материалом, доступным для экспертизы в случаях массовых катастроф, криминальных захоронений или археологических раскопок [4]. Стопа, как дистальный отдел нижней конечности, несет на себе отпечаток как генетически запрограммированных процессов роста и развития, так и влияния функциональных нагрузок в онто-

генезе [5–6]. Однако, в отличие от кисти, стопа в меньшей степени подвержена тонкой специализации отдельных лучей, что позволяет рассматривать ее кости как относительно «нейтральные» в функциональном отношении и, следовательно, более информативные для оценки морфологических особенностей индивида, обусловленных процессами морфогенеза [3, 7].

Плюсневые кости (ossa metatarsalia [I–V]) представляют собой типичные короткие трубчатые кости, каждая из которых имеет тело (corpus), основание (basis) и головку (caput). Их морфогенез контролируется сложным каскадом генети-

ческих регуляторных механизмов, среди которых ключевую роль играют гомеостатические гены (Нох-гены), определяющие план строения конечностей у всех позвоночных [6, 8]. Экспериментальные данные свидетельствуют, что именно Нох-гены задают количество лучей и их базовые пропорции, тогда как модулирующее влияние на окончательные размеры оказывают половые стероиды, особенно андрогены, в критический период внутриутробного развития [8–9]. Это объясняет существование половых особенностей в строении стопы, который может быть зафиксирован остеометрически [10–11].

Несмотря на очевидную значимость, плюсневые кости долгое время оставались на периферии антропологических исследований, уступая место исследованию более крупных костей (таранной, пяточной) [1, 12]. Имеющиеся работы фокусируются преимущественно на длине плюсневых костей как на предикторе общего роста, тогда как поперечные размеры, объем и плотность костной ткани изучены фрагментарно [13–16]. Кроме того, большинство публикаций основано на рентгенографических данных живых лиц, что не позволяет напрямую экстраполировать результаты на сухие костные препараты [17–19].

Таким образом, актуальность настоящего исследования определяется необходимостью создания детальных остеометрических стандартов для плюсневых костей на паспортизированном остеологическом материале [20–22].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью работы явилось изучение изменчивости линейных, весовых и объемных параметров плюсневых костей мужской стопы и выявление статистически значимых закономерностей их распределения по лучам.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работа выполнена на базе паспортизированной остеологической коллекции кафедры общей и клинической морфологии медицинского факультета Ульяновского государственного университета, полученной при выполнении гранта

Российского фонда фундаментальных исследований № 08-04-99059 «Биоинформационная модель этнических, возрастных и идентификационных особенностей конечностей жителей Среднего Поволжья». Коллекция сформирована в соответствии с действующим законодательством Российской Федерации и правилами работы с анатомическими препаратами. Было отобрано 50 мужских правых стоп лиц в возрасте от 20 до 70 лет с полной сохранностью всех пяти плюсневых костей. Критерием исключения служили макроскопически видимые следы травм, дегенеративных изменений или аномалий развития.

После отбора стоп производилась анатомическая экзартикуляция пальцев, их маркировка, проведение длительной мацерации в горячей проточной воде до полного отделения мягких тканей, затем кости обезжиривались в спирт-эфирной смеси (спирт и эфир в равных частях) и высушивались в вытяжном шкафу при комнатной температуре. Были проведены измерения цифровым штангенциркулем ШЦЦ-1-150-0,01 с точностью 0,01 мм по модифицированной авторской методике, в которой все измеряемые по классическому протоколу Мартина–Саллера механическим скользящим циркулем параметры, идентифицированы исключительно как проекционные размеры (1), соответствующим образом модифицированы (2) и адаптированы к использованию современного цифрового штангенциркуля (3) [20–21]. На рис. 1 изображены использованные в работе остеометрические параметры в виде проекций на микрофотографии плюсневой кости I пальца стопы. Для каждой плюсневой кости (I–V) фиксировали следующие параметры: костная длина, КД (bone length, BL) – расстояние от середины верхнего края суставной поверхности основания до наиболее дистальной точки головки в сагиттальной плоскости; ширина диафиза, ШД (width of the diaphysis, WD) – наименьшая ширина тела кости на уровне середины, измеренная во фронтальной плоскости; высота диафиза, ВД (height of the diaphysis, HD) – наименьшая высота тела кости на уровне середины, измеренная в сагиттальной плоскости;

ширина основания, ШО (base width, BW) – расстояние между наиболее выступающими медиальной и латеральной точками суставной поверхности основания; высота основания, ВО (base height, BH) – расстояние между тыльной и подошвенной точками основания перпендикулярно его суставной поверхности; ширина головки, ШГ (head width, HW) – максимальный поперечный размер суставной поверхности головки; высота головки, ВГ (head height, HH) – максимальный дорсоплантарный размер суставной поверхности головки (Hyer et al., 2004). Массу кости в г определяли на электронных весах «BS-100 Touchscreen» (American Weigh Scales, Inc., США) с точностью 0,01 г. Объем (см³) измеряли методом погружения в градуированный цилиндр с дистиллированной водой (t = 20 °C) с фиксацией нижнего мениска (точность 0,05 мл). Плотность (г/см³) рассчитывали, как отношение массы к объему [23].

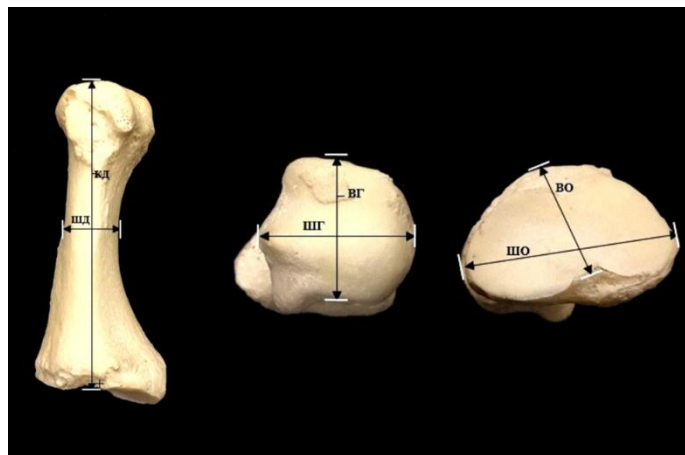


Рис. 1. Проекция остеометрических параметров на фотоизображения I плюсневой кости

Fig. 1. Projections of osteometric parameters onto photographs of the first metatarsal bone

Данные обрабатывали в пакете OriginPro 2024 (OriginLab Corporation, USA). Рассчитывали среднюю арифметическую (M), стандартное отклонение (σ), стандартную ошибку средней (m), коэффициент вариации ($CV = \sigma/M \times 100\%$). Проверку нормальности распределения проводили с использованием Shapiro-Wilk W Test. Для оценки группы лучей одного номера плюсневых костей

применяли однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с апостериорным критерием Bonferroni. Корреляционная таблица остеометрических показателей построена на основе корреляции Pearson (r). Критический уровень значимости принимали $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты описательной статистики для всех изученных параметров представлены в таблице 1. Наибольшая костная длина зафиксирована у II плюсневой кости ($72,7 \pm 0,81$ мм), что достоверно превышает длину I ($60,5 \pm 0,81$ мм) и V ($63,4 \pm 0,68$ мм) костей ($p < 0,05$). Минимальная длина характерна для I кости. Ранжированный ряд по убыванию длины имеет вид: II > III > IV > V > I. Коэффициент вариации длины минимален для IV кости (7,2%), что свидетельствует о стабильности этого признака, и максимален для I кости (9,1%). Полученные данные согласуются с результатами других авторов, отмечающих наибольшую длину II плюсневой кости в различных популяциях [11, 24–26].

Ширина диафиза (ШД) максимальна у I плюсневой кости ($12,7 \pm 0,41$ мм), минимальна – у II ($6,9 \pm 0,29$ мм). Ранжированный ряд по убыванию ширины имеет вид: I > V > IV > III = II. Коэффициент вариации ШД колеблется от 21,1% (I кость) до 30,4% (IV кость), указывая на умеренную изменчивость. Высота диафиза (ВД) также доминирует у I кости ($13,2 \pm 0,40$ мм), наименьшие значения отмечены у III кости ($7,4 \pm 0,27$ мм). Примечательно, что ВД II кости варьирует наиболее сильно ($CV = 33,1\%$), что, вероятно, отражает функциональную вариабельность этой опорной точки переднего отдела стопы [6, 27].

Ширина основания I плюсневой кости ($26,4 \pm 0,97$ мм) почти вдвое превышает аналогичные показатели остальных костей (от 10,9 мм на IV до 14,9 мм на II). Ранжированный ряд убывания ширины основания имеет вид: I > II > V > III > IV. Высота основания также максимальна на I кости ($25,3 \pm 0,58$ мм) и снижается к IV ($16,4 \pm 0,52$ мм), с небольшим подъемом на V ($17,6 \pm 0,45$ мм). Эти данные соответствуют на-

Таблица 1. Остеометрические показатели мужских плюсневых костей стопы человека ($M \pm m$, $n = 50$)
Table 1. Osteometric parameters of the male metatarsal bones of the human foot ($M \pm m$, $n = 50$)

Признак	Порядковый номер плюсневой кости				
	I	II	III	IV	V
Костная длина (мм)	60,51 ± 0,81	72,71 ± 0,81	68,10 ± 0,69	66,44 ± 0,71	63,40 ± 0,68
Ширина диафиза (мм)	12,72 ± 0,41	6,90 ± 0,29	7,12 ± 0,26	7,41 ± 0,33	8,52 ± 0,36
Высота диафиза (мм)	13,20 ± 0,40	8,32 ± 0,41	7,44 ± 0,27	8,10 ± 0,36	8,82 ± 0,33
Ширина основания (мм)	26,44 ± 0,97	14,91 ± 0,49	12,74 ± 0,38	10,91 ± 0,33	14,61 ± 0,29
Высота основания (мм)	25,32 ± 0,58	19,72 ± 0,54	18,53 ± 0,46	16,43 ± 0,52	17,63 ± 0,45
Ширина головки (мм)	21,71 ± 0,60	10,23 ± 0,38	8,51 ± 0,29	8,41 ± 0,34	9,12 ± 0,37
Высота головки (мм)	20,54 ± 0,53	14,54 ± 0,45	13,80 ± 0,40	13,52 ± 0,42	12,24 ± 0,44
Масса (вес) (г)	8,93 ± 0,37	5,31 ± 0,18	4,21 ± 0,13	4,22 ± 0,12	4,53 ± 0,19
Объем (см ³)	9,51 ± 0,44	4,20 ± 0,13	3,62 ± 0,11	3,34 ± 0,09	4,30 ± 0,16
Плотность (г/см ³)	0,92 ± 0,02	1,31 ± 0,03	1,24 ± 0,03	1,30 ± 0,03	1,14 ± 0,03

блюдениям о большей массивности первой плюсневой кости как основного опорного элемента переднего отдела стопы [23, 28]. Как ширина, так и высота головки закономерно убывают от I к V лучу, хотя для ширины головки V кости ($9,1 \pm 0,37$ мм) отмечено несколько более высокое значение, чем для IV ($8,4 \pm 0,34$ мм). Ранжированный ряд по убыванию ширины головки имеет следующий вид: I > II > V > III > IV; ряд высоты: I > II > III > IV > V. Коэффициенты вариации размеров головки (18–28%) сопоставимы с таковыми для диафиза.

Масса и объем костей максимальны у I плюсневой кости ($8,9 \pm 0,37$ г и $9,5 \pm 0,44$ мл соответственно) и минимальны у IV ($4,2 \pm 0,13$ г и $3,3 \pm 0,09$ мл). Объем V кости ($4,3 \pm 0,16$ мл) несколько превышает объем II ($4,2 \pm 0,13$ мл). Коэффициенты вариации массы и объема составляют от 19,8% до 31,6%, что указывает на значительную меж-индивидуальную изменчивость этих показателей. Полученные значения массы и объема могут быть использованы для оценки минеральной насыщенности и биомеханических свойств костей [29].

Результаты дисперсионного анализа по апостериорному критерию Бонферрони. Статистически значимые различия ($p < 0,05$) между большинством сравниваемых пар костей подтверждены для всех параметров. Исключения составили пары, для которых различия не достигали уровня значимости: длина плюсневых костей: I и

V ($p = 0,06$), III и IV ($p = 1,0$); ширина диафиза: II, III, IV ($p = 1,0$); высота диафиза: II и III ($p = 0,79$); ширина основания: III и IV ($p = 0,21$); высота основания: II и V ($p < 0,05$); ширина головки: II и V ($p = 0,66$), III и IV ($p = 1,0$); высота головки: II и IV ($p = 0,90$), III и IV ($p = 1,0$); масса: II и V ($p = 0,05$), III и IV ($p = 1,0$); объем: II и III ($p = 0,56$).

Особого внимания заслуживает параметр плотности. Установлено, что плотность I ($0,95$ г/см³) и V ($1,1$ г/см³) костей статистически значимо ниже, чем плотность II–IV костей ($1,2$ – $1,3$ г/см³, $p < 0,05$), при этом различия между I и V незначимы ($p = 0,09$). Это указывает на меньшую минерализацию краевых лучей стопы, что может быть связано с их биомеханической ролью [29, 30].

Также, был проведен линейный корреляционный анализ Пирсона остеометрических параметров плюсневых костей. Проведенный корреляционный анализ позволил выявить ряд статистически значимых взаимосвязей между линейными параметрами плюсневых костей и наглядно представить «корреляционные образы» взаимосвязей их остеометрических параметров. Результаты корреляционного анализа позволили дать интегративную оценку структуре, направленности и величине линейных взаимосвязей исследованных параметров (табл. 2).

Для I плюсневой кости выявлены выраженные положительные корреляции между несколькими параметрами. Установлена высокая корреляция

между шириной головки и высотой основания ($r = 0,88$, $p < 0,05$). Также отмечена сильная связь между шириной головки и шириной основания ($r = 0,86$, $p < 0,05$). Значимая положительная корреляция обнаружена между высотой головки и шириной диафиза ($r = 0,85$, $p < 0,05$), а также между высотой диафиза и шириной головки ($r = 0,83$, $p < 0,05$). Кроме того, выявлена высокая корреляция между костной длиной и шириной диафиза ($r = 0,82$, $p < 0,05$).

Для II плюсневой кости характерны выраженные взаимосвязи между параметрами диафиза и головки. Установлена высокая корреляция между шириной диафиза и шириной головки ($r = 0,84$, $p < 0,05$). Также выявлена сильная корреляционная связь между шириной головки и высотой головки ($r = 0,83$, $p < 0,05$). Отмечена значимая корреляция между шириной диафиза и высотой головки ($r = 0,82$, $p < 0,05$). Кроме того, наблюдается высокая корреляция между шириной диафиза и высотой основания ($r = 0,80$, $p < 0,05$).

Для III плюсневой кости выявлены наиболее выраженные корреляционные связи среди всех исследованных костей. Установлена очень высокая корреляция между шириной диафиза и высотой основания ($r = 0,92$, $p < 0,05$). Также выявлена сильная корреляция между шириной основания и высотой основания ($r = 0,90$, $p < 0,05$). Высокая корреляция отмечена между шириной диафиза и высотой диафиза ($r = 0,88$, $p < 0,05$), а также между высотой диафиза и шириной основания ($r = 0,86$, $p < 0,05$). Кроме того, установлена сильная связь между шириной основания и шириной головки ($r = 0,85$, $p < 0,05$).

Для IV плюсневой кости также выявлены значимые положительные корреляции между параметрами диафиза и головки. Установлена высокая корреляция между шириной головки и высотой диафиза ($r = 0,87$, $p < 0,05$). Также отмечена сильная связь между шириной головки и шириной диафиза ($r = 0,86$, $p < 0,05$). Значимая корреляция выявлена между высотой основания и шириной головки ($r = 0,84$, $p < 0,05$), а также между высотой диафиза и шириной основания ($r = 0,83$, $p < 0,05$).

Таблица 2. Значения коэффициентов корреляции остеометрических показателей

Table 2. Values of correlation coefficients of osteometric parameters

Кости плюсны	Остеометрические показатели							
		Д	ШД	ВД	ШО	ВО	ШГ	ВГ
I	Д		0,74	0,57	0,62	0,64	0,78	0,76
	ШД	–		0,73	0,78	0,75	0,90	0,85
	ВД	–	–		0,79	0,49	0,76	0,72
	ШО	–	–	–		0,68	0,83	0,81
	ВО	–	–	–	–		0,80	0,69
	ШГ	–	–	–	–	–		0,86
	ВГ	–	–	–	–	–	–	
II	Д		0,71	0,61	0,59	0,61	0,60	0,72
	ШД	–		0,82	0,82	0,75	0,85	0,83
	ВД	–	–		0,76	0,65	0,79	0,70
	ШО	–	–	–		0,67	0,82	0,76
	ВО	–	–	–	–		0,68	0,85
	ШГ	–	–	–	–	–		0,82
	ВГ	–	–	–	–	–	–	
III	Д		0,50	0,48	0,49	0,57	0,48	0,59
	ШД	–		0,82	0,82	0,84	0,86	0,82
	ВД	–	–		0,84	0,90	0,84	0,91
	ШО	–	–	–		0,86	0,90	0,86
	ВО	–	–	–	–		0,84	0,92
	ШГ	–	–	–	–	–		0,88
	ВГ		–	–	–	–	–	
IV	Д		0,51	0,61	0,45	0,62	0,42	0,57
	ШД	–		0,78	0,70	0,80	0,86	0,78
	ВД	–	–		0,68	0,87	0,81	0,84
	ШО	–	–	–		0,71	0,73	0,69
	ВО	–	–	–	–		0,76	0,83
	ШГ	–	–	–	–	–		0,82
	ВГ		–	–	–	–	–	
V	Д		0,51	0,30	– 0,02	0,45	0,49	0,53
	ШД	–		0,40	0,25	0,34	0,74	0,71
	ВД	–	–		– 0,06	0,53	0,65	0,78
	ШО	–	–	–		– 0,23	0,26	0,06
	ВО	–	–	–	–		0,38	0,51
	ШГ	–	–	–	–	–		0,83
	ВГ		–	–	–	–	–	

Примечания. Д – длина (length); ШД – ширина диафиза (width of the diaphysis); ВД – высота диафиза (height of the diaphysis); ШО – ширина основания (base width); ВО – высота основания (base height); ШГ – ширина головки (head width); ВГ – высота головки (head height)

Для V плюсневой кости количество сильных корреляционных связей значительно меньше. Выявлена высокая положительная корреляция между шириной головки и шириной диафиза ($r = 0,83$, $p < 0,05$). Остальные корреляционные связи между параметрами имеют умеренную или слабую силу. В целом результаты корреляционного анализа позволили определить явную специфичность структуры, направленности и величины линейных взаимосвязей остеометрических параметров всех пяти плюсневых костей мужской стопы.

Проведенное исследование подтвердило наличие выраженной морфологической гетерогенности плюсневых костей в пределах одной стопы [11, 24]. Полученные данные согласуются с концепцией о различной функциональной нагрузке на пальцы стопы в сравнительно-анатомическом и онтогенетическом аспектах [5, 6]. Доминирование I плюсневой кости по большинству параметров (ширина, высота, масса, объем) объясняется ее ключевой ролью в опорной функции переднего отдела стопы и передаче веса тела при отталкивании в фазу переката стопы [15, 28]. Это подтверждается и наименьшей плотностью I кости: по-видимому, ее больший объем обеспечивает необходимую механическую прочность при относительно меньшей плотности за счет трабекулярной архитектоники. Выявленная максимальная длина II плюсневой кости является общеизвестным фактом, однако новым представляется детальный анализ вариативности этого признака [11, 25]. Высокий коэффициент вариации длины I кости (9,1%) может быть связан с большей индивидуальной изменчивостью проксимального отдела 1-го луча, на который влияют особенности походки и обуви. Напротив, минимальная вариация длины IV кости (7,2%) позволяет предположить ее консервативность как «центральной» кости, в меньшей степени подверженной внешним воздействиям.

Интересным результатом является «волнообразное» изменение некоторых параметров (ширина головки, объем) с повышением значений на

V луче по сравнению с IV. Это может быть объяснено биомеханической ролью V плюсневой кости как латерального стабилизатора стопы, испытывающего нагрузки при супинации и инверсии. Работы по биомеханике показывают, что при ходьбе по неровной поверхности нагрузка на V луч возрастает, что может стимулировать remodeling костной ткани [27]. Сравнение с литературными данными затруднено ввиду ограниченного числа работ по остеометрии плюсневых костей на сухом материале. Рентгеновские антропометрические исследования живых лиц, в том числе и наши собственные, дают несколько иные абсолютные цифры из-за проекционных искажений [17–19]. Тем не менее, аналогичная общая тенденция к уменьшению размеров от I к V лучу (кроме параметров костной длины и плотности) прослеживается и в большинстве рентгеновских остеометрических параметров.

Полученные различия в плотности костей I и V по сравнению со II–IV могут иметь важное физиологическое и клиническое значение [29–30]. Известно, что переломы плюсневых костей («маршевые» переломы) чаще возникают во II и III костях, что может быть связано не только с пиковыми нагрузками, но и с их относительно высокой плотностью и жесткостью, делающей их менее устойчивыми к циклическим нагрузкам [31]. Меньшая плотность краевых костей может обеспечивать их амортизационную способность. Важно отметить, что наши данные согласуются с исследованиями плюсневых костей в различных популяциях [11, 22, 24–26, 32–33]. Собранные данные по мужским метатарзальным костям позволяют пополнить базу данных не только о линейных размерах, но и о физических свойствах костей [10–11, 22].

Проведенный корреляционный анализ остеометрических параметров плюсневых костей выявил наличие статистически значимых положительных взаимосвязей между рядом линейных показателей. Наиболее выраженные корреляции установлены между параметрами поперечных размеров костей – шириной и высотой основания, диафиза и головки, что свидетельствует о

согласованности формирования различных отделов плюсневых костей. Наибольшее количество сильных корреляционных связей выявлено для III плюсневой кости, что указывает на более простую ориентацию в пространстве и однозначность измерений. Для I и IV плюсневых костей также характерно наличие выраженных взаимосвязей между параметрами головки и основания, отражающих функциональную интеграцию проксимальных и дистальных отделов кости. Для V плюсневой кости количество сильных корреляционных связей оказалось меньшим, что может быть обусловлено ее относительно меньшей функциональной нагрузкой, более вариабельной морфологией или методологическими неточностями. В целом выявленные корреляционные зависимости свидетельствуют о морфофункциональной согласованности развития различных отделов плюсневых костей и отражают закономерности их структурной организации, обусловленные биомеханикой опорно-двигательной функции стопы.

Ограничением настоящего исследования является анализ только мужской выборки. Это было сделано преднамеренно, чтобы исключить влияние фактора полового диморфизма на первом этапе работы. Дальнейшие исследования на женской выборке позволят построить дискриминантные модели для определения пола. Также в работе не учитывалась билатеральная асимметрия, поскольку предварительный анализ не выявил значимых различий между правыми и левыми стопами (данные не приведены), что согла-

суется с результатами других исследований дистальных сегментов конечностей человека [17–18, 34–37].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования получены некоторые остеометрические и физические характеристики всех пяти плюсневых костей мужской стопы. Установлены статистически значимые межкостные различия и закономерности распределения размеров по лучам. Наибольшей вариабельностью обладают поперечные размеры диафизов и физические параметры, наименьшей – длина костей. Краевые пальцы (I и V) существенно отличаются от центральных (II–IV) не только по линейным размерам, но и по плотности костной ткани, что отражает их адаптацию к различным биомеханическим условиям. В настоящем исследовании показаны также различия «корреляционных образов» остеометрических параметров плюсневых костей мужской стопы. Научно-практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных данных в судебно-медицинской идентификации личности. Представленные средние значения и границы нормы могут служить референтными для экспертов при работе с фрагментированными останками. Кроме того, результаты расширяют представления о морфологической вариабельности костных структур стопы и могут быть полезны в ортопедии и спортивной медицине для понимания патогенеза травм плюсневых костей.

Литература

References

- 1 Zvyagin VN, Eremenko EA. Diagnostika massivnosti skeleta i somatotipa cheloveka po kostyam stopy. *Sudebno-meditsinskaya ekspertiza*. 2003;46(3):17–23. *In Russian*
- 2 Pigolkin YuI, Zolotenkova GV, Berezovskiy DP. Metodologicheskie osnovy opredeleniya vozrasta cheloveka. *Sudebno-meditsinskaya ekspertiza*. 2020;63(3):45–50. <https://doi.org/10.17116/sudmed20206303145>. *In Russian*
- 3 Rösing FW, Graw M, Marré B et al. Recommendations for the forensic diagnosis of sex and age from skeletons. *Homo*. 2007;58(1):75–89. <https://doi.org/10.1016/j.jchb.2005.07.002>
- 4 Sineva IM. Informatsionnaya znachimost' osteometricheskikh issledovaniy v sovremennoy antropologii. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 23: Antropologiya*. 2010;(4):57–64. *In Russian*
- 5 Perepelkin AI, Krayushkin AI, Doronin AB i dr. Autopodium cheloveka (anatomiya stopy i kisti). Volgograd: izd-vo VolgGMU, 2020. 136 s. *In Russian*

- 6 Marchi D. The cross-sectional geometry of the hand and foot bones of the hominoidea and its relationship to locomotor behavior. *J Hum Evol.* 2005;49(6):743–761. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2005.08.002>
- 7 McFadden D, Bracht MS. Sex differences in the relative lengths of metacarpals and metatarsals in gorillas and chimpanzees. *Horm Behav.* 2005;47(1):99–111. <https://doi.org/10.1016/j.yhbeh.2004.08.013>
- 8 Khayrullin RM, Fomina AV, Aynullova NK. Variabel'nost' znacheniy 2d:4d pal'tseвого индекса u dikikh i laboratornykh zhivotnykh. *Fundamental'nye issledovaniya.* 2013;6(3):611–618. *In Russian*
- 9 McFadden D, Bracht MS. The relative lengths and weights of metacarpals and metatarsals in baboons (papio hamadryas). *Horm Behav.* 2003;43(2):347–55. [https://doi.org/10.1016/s0018-506x\(02\)00048-x](https://doi.org/10.1016/s0018-506x(02)00048-x)
- 10 Mel'nikov AA, Khayrullin RM, Safiullina AF, Khayrullin FR. Diskriminantnyy analiz pal'tsevoy i polovoy izmenchivosti osteometricheskikh pokazateley srednikh falang stopy cheloveka. *Fundamental'nye issledovaniya.* 2014;10(4):693–699. *In Russian*
- 11 Mountrakis C, Eliopoulos C, Koiliakos CG, Manolis SK. Sex determination using metatarsal osteometrics from the Athens collection. *Forensic Sci Int.* 2010;200(1–3):178.e1–7. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2010.03.041>
- 12 Bayroshevskaya MV, Safiullina AF, Khayrullin RM. Chastota tipov pyatnochnoy kosti po modifitsirovannoy klassifikatsii form tarannykh sustavnykh poverkhnostey. *Morfologicheskie vedomosti.* 2014;22(1):26–32. [https://doi.org/10.20340/mv-mn.2014.0\(1\):26-32](https://doi.org/10.20340/mv-mn.2014.0(1):26-32). *In Russian*
- 13 Bidmos MA. Metatarsals in the estimation of stature in South Africans. *J Forensic Leg Med.* 2008;15(8):505–509. <https://doi.org/10.1016/j.jflm.2008.05.007>
- 14 Cordeiro C, Muñoz-Barús JJ, Wasterlain S et al. Predicting adult stature from metatarsal length in a Portuguese population. *Forensic Sci Int.* 2009;193(1–3):131.e1–4. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2009.09.017>
- 15 De Grootel I, Humphrey LT. Body Mass and Stature Estimation Based on the First Metatarsal in Humans. *Am J Phys Anthropol.* 2011;144(4):625–632. <https://doi.org/10.1002/ajpa.21458>
- 16 Park JH, Lee M, Kim D et al. Estimating Adult Stature Using Metatarsal Length in the Korean Population: A Cadaveric Study. *Int J Environ Res Public Health.* 2022;19(22):15124. <https://doi.org/10.3390/ijerph192215124>
- 17 Ermolenko AS, Ryakhovskiy MA, Khayrullin RM. Bilateral'naya izmenchivost' rentgenoosteometricheskikh pokazateley pyastnykh kostey kisti cheloveka. *Saratovskiy nauchno-meditsinskiy zhurnal.* 2009;5(3):313–315. *In Russian*
- 18 Ermolenko AS, Ryakhovskiy MA, Khayrullin RM. Sravnitel'noe issledovanie izmenchivosti rentgenoosteometricheskikh pokazateley pyastnykh kostey v zavisimosti ot klimato-geograficheskogo faktora. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy.* 2009;16(1):175–176. *In Russian*
- 19 Khayrullin RM, Ryakhovskiy MA, Ermolenko AS, Akhmetova GR. Morfologiya trubchatykh kostey stopy cheloveka po dannym rentgenologicheskikh issledovaniy. *Morfologiya.* 2009;136(4):145–146. *In Russian*
- 20 Mel'nikov AA, Safiullina AF, Bayroshevskaya MV, Khayrullin RM. Osteometricheskie pokazateli kostnykh elementov stopy sovremennogo cheloveka. Problemy sovremennoy morfologii cheloveka: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 80-letiyu professora B.A. Nikityuka. Moskva: Rossiyskiy gosudarstvennyy universitet fizicheskoy kul'tury, sporta i turizma, 2013. S. 86–88. *In Russian*
- 21 Khayrullin RM, Safiullina AF, Nikiforov RV et al. Osteometric and physical variability of the human foot bones. *Rev Arg Anat Clin.* 2013;5(2):124
- 22 Bezrukova OD, Safiullina AF, Nikiforov RV et al. Osteometric sex differences of foot bones are concentrated on the proximal-distal axis and on 2th and 4th rays. The 6th International Symposium of Clinical and Applied Anatomy. Rijeka: The University of Rijeka, 2014. pp. 73–74
- 23 Hyer CF, Philbin TM, Berlet GC, Lee TH. The obliquity of the first metatarsal base. *Foot Ankle Int.* 2004;25(10):728–732. <https://doi.org/10.1177/107110070402501006>
- 24 Robling AG, Ubelaker DH. Sex estimation from the metatarsals. *J Forensic Sci.* 1997;42(6):1062–1069.
- 25 Torres G, Menéndez Garmendia A, Sánchez-Mejorada G, Gómez-Valdés JA. Estimación del sexo con metacarpos y metatarsos para población mexicana. *Rev Esp Med Legal.* 2020;46:12–19. <https://doi.org/10.1016/j.remle.2018.09.004>
- 26 Bidmos MA, Adebisin AA, Mazenganya P et al. Estimation of sex from metatarsals using discriminant function and logistic regression analyses. *Aust J Forensic Sci.* 2021;53(5):543–556. <https://doi.org/10.1080/00450618.2019.1711180>
- 27 Higurashi Y, Goto R, Nakano Y. Integrative experimental and morphological study of the metacarpal and metatarsal bones of the Japanese macaque. *Anthrop Sci.* 2019;127(2):123–130. <https://doi.org/10.1537/ase.190511>
- 28 Zipfel B, Kidd R. Hominin first metatarsals (SKX 5017 and SK 1813) from Swartkrans: a morphometric analysis. *Homo.* 2006;57(2):117–131. <https://doi.org/10.1016/j.jchb.2006.01.001>
- 29 Sveshnikov KA, Sveshnikov AA. Gendernye razlichiya massy mineral'nykh veshchestv v kostyakh skeleta v vozrastnom aspekte. *Fundamental'nye issledovaniya.* 2012;5(1):110–114. *In Russian*
- 30 McFadden D, Bracht MS. Sex and race differences in the relative lengths of metacarpals and metatarsals in human skeletons. *Early Hum Dev.* 2009;85(2):117–124. <https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2008.07.001>

- 31 Ramponi DR, Hedderick V, Maloney SC. Metatarsal Stress Fractures. *Adv Emerg Nur J*. 2017;39(3):168–175. <https://doi.org/10.1097/TME.0000000000000154>
- 32 Mel'nikov AA, Nikiforov RV, Khayrullin RM, Khayrullin FR. Osteometricheskie parametry srednikh falang stopy cheloveka i ikh polovye razlichiya. *Morfologicheskie vedomosti*. 2014;22(1):70–78. [https://doi.org/10.20340/mv-mn.2014a.0\(1\):70–78](https://doi.org/10.20340/mv-mn.2014a.0(1):70-78). *In Russian*
- 33 Case DT, Ross AH. Sex determination from hand and foot bone lengths. *J Forensic Sci*. 2007;52(2):264–270. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2006.00365.x>
- 34 Khayrullin RM. Sootnoshenie morfologicheskoy i funktsional'noy asimmetrii kisti u cheloveka. *Morfologiya*. 2001;120(4):88. *In Russian*
- 35 Khayrullin RM. Morfologicheskie tipy kisti v yunosheskom periode individual'nogo razvitiya. *Morfologicheskie vedomosti*. 2001;(1-2):103–105. *In Russian*
- 36 Khayrullin RM. Effektivnost' indeksov fluktuiruyushchey asimmetrii dlya otsenki morfologicheskikh priznakov cheloveka. *Morfologicheskie vedomosti*. 2002;(1-2):52–54. *In Russian*
- 37 Ermolenko AS, Khayrullin RM. Zakonomernosti bilateral'noy organizatsii dliny falang kisti cheloveka. *Uchenye zapiski SPbGMU im. I.P. Pavlova*. 2011;18(2):55–56. *In Russian*

Авторы заявляют об отсутствии каких-либо конфликтов интересов при планировании, выполнении, финансировании и использовании результатов настоящего исследования

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зеркалова Яна Игоревна, Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия; ORCID: 0009-0004-1106-5130, e-mail: zerkalova.yana@mail.ru

Ермоленко Александр Сергеевич, доктор медицинских наук, Университет «Реавиз», Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0000-0002-2163-7911, e-mail: osteon@yandex.ru

Зеркалова Юлия Феликсовна, кандидат медицинских наук, доцент, Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия; ORCID: 0009-0003-6681-4488, e-mail: ju.zerkalova@rambler.ru

The authors declares that she has no any conflicts of interest in the planning, implementation, financing and use of the results of this study

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Yana I. Zerkalova, Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia; ORCID: 0009-0004-1106-5130, e-mail: zerkalova.yana@mail.ru

Aleksandr S. Ermoolenko, Doctor of Medical Sciences, REAVIZ Private University, St. Petersburg, Russia; ORCID: 0000-0002-2163-7911, e-mail: osteon@yandex.ru

Yuliya F. Zerkalova, Candidate of Medical Sciences, Docent, Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia; ORCID: 0009-0003-6681-4488, e-mail: ju.zerkalova@rambler.ru